

論文

가압용침법에 의한 Al/Al₂O₃ 금속복합재료의 기계적 물성과 마모기구

송정일* · 봉하동* · 양유창* · 한경섭*

Mechanical Properties and Wear Mechanism of Al₂O₃ Metal Matrix Composites by Squeeze Infiltration Method

J.I. Song*, H.D. Bong*, Y.C. Yang* and K.S. Han*

ABSTRACT

The Al/Al₂O₃ metal matrix composites(MMCs) were fabricated by squeeze infiltration method. Uniform distribution of reinforcements and good bondings were found in microstructure of Al/Al₂O₃ composites. Mechanical tests were carried out under various test conditions to identify mechanical behavior of fiber reinforce MMCs clearly, and the wear mechanism of Al/Al₂O₃ composites were investigated. Preforms used were ready-made preforms(Saffil and Fiberfrax) and POSTECH which have volume fractions of 0.15 and 0.2. The dimensions of preforms were 11cm diameter by 2cm thickness, respectively.

The reinforcements with volume fractions of 0.15 and 0.2 resulted in an increase in the tensile strength and hardness compared with the corresponding values for the AC8A alloy matrix. Tensile strength and hardness of POSTECH and Saffil composites were better than those of Fiberfrax composites. However, impact energy decreased with increasing hardness by the addition of reinforcements. Wear resistance were strongly dependent upon the sliding speed. Dominant wear mechanisms are suggested from wear surface analyses. The major wear mechanism of MMCs is the abrasive wear at low to intermediate sliding speed, and the melt and slip wear at intermediate to high sliding speed.

Key Words : Metal Matrix Composites(금속복합재료), Squeeze Infiltration Method(가압용침법), Preform(예비성형체), Wear mechanism(마모기구), Adhesive wear(응착마모), Abrasive wear(연삭마모).

초 록

본 연구는 상용화되어 있는 “Saffil” 및 “Fiberfrax”의 예비성형체와 자체제조한 예비성형체(POSTECH)를 이용하여 가압용침법으로 금속복합재료를 제조한 후 기본물성 및 마모특성을 상호 비교하고자 한 것이다.

POSTECH과 Saffil 금속복합재료의 인장강도는 모재에 비해 약 10%의 향상을 보였으나, 보강재 자체의 기본물성이 떨어지는 Fiberfrax는 약 4%의 향상에 그쳤다. 또한 부피분율의 증가에 따른

* 정회원, 포항공과대학 기계공학과

인장강도의 증가폭은 크지 않았다.

충격에너지는 기지재인 AC8A 합금에 비하여 대체로 낮은 값을 나타내었고, 경도는 기지재인 AC8A 합금보다 금속복합재료가 13%~15% 범위의 증가를 보였다. 특히 금속복합재료의 경도가 증가할수록 충격에너지는 떨어지는 것으로 나타났다.

또한 금속복합재료의 내마모성은 기지재 보다 크게 향상되었으며, 기지재의 마모기구는 저속에서는 연삭마모, 중속에서는 응착마모, 그리고 고속에서는 응착마모와 밀림현상이 지배적이었으며, 금속복합재료인 경우 저속에서는 연삭마모였으며, 중속과 고속에서는 보강재의 박힘과 밀림현상에 의한 마모가 지배적이었다. 전체적으로 속도에 따른 마모거동은 POSTECH과 Saffil 및 Fiberfrax의 금속복합재료가 서로 비슷한 특성을 나타내었다.

1. 서 론

단섬유 보강 금속복합재료는 비강성, 비강도 등과 같은 기계적 성질이 우수하고, 기존의 금속재료 제조기술을 제조에 응용할 수 있다는 장점 때문에 자동차 산업의 기계부품과 항공기산업 등의 대체 재료로서 관심의 대상이 되고 있다. 특히, 알루미늄기지 금속복합재료는 양호한 내식성을 갖고 있으며, 질량감소에 효과적이어서 그 응용범위가 확대되고 있다[1~2]. 이러한 금속복합재료는 금속과 섬유의 반응문제, 접합성(wettability), 계면등에 관한 기초적 연구단계를 거쳐 최근에는 구미, 일본등의 선진국에서 미사일, 우주기기, 항공기 구조재, 제트엔진 및 자동차 경량화용 등에 응용을 목적으로 급격한 진보를 이루어왔다[1~4]. 특히, 알루미늄(Al_2O_3)와 실리코carb라이드(SiC)를 보강제로한 금속복합재료는 보강섬유의 취화 작용으로 인해 파괴시까지의 작은 연성(ductility)과 낮은 파괴인성등으로 인해 제한적으로 개발되고 있으나, 고온에서의 우수한 인장강도, 내피로성, 내마모성, 저열팽창성을 유지하는 장점을 가지고 있어 자동차 엔진의 경량화용으로 사용하려는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다[5~8].

그러나 종래에 금속복합재료의 제조방법과 기계적 성질 규명에 관한 논문은 많이 발표되었으나, 마모에 관한 연구는 부족한 실정이다. 지금까지의 연구에서, 알루미늄합금에 경도가 높은 세라믹 보강재를 첨가하거나[9~12], 탄소(graphite), 운모(mica)등의 비교적 경도가 낮은 보강재를 첨가함[13~15]으로써 내마모성이 향상됨이 발표되었다.

전자는 보강재 자체의 높은 내마모성에 의한 효과이고, 후자는 마모에 의해 생성된 부드러운 입자가 마찰면에 존재하여 윤활 작용을 하기 때문으로 분석된다. Hosking[16]등과 Rana[17]등의 연구결과에 의하면 보강재의 크기가 마모에 미치는 영향에 관한 연구를 통하여 내마모성이 보강재의 평균 크기와 양에 비례하며, 금속복합재료의 주된 마모기구는 연삭마모인 것이 확인되었다. 또한 Han등[18]은 내마모성을 향상시키는 방법으로 경질의 입자를 사용하는 방법과 탄소와 같은 고체윤활제를 사용하는 방법을 연구한 바 있다. 지금까지, 마모 거동에 있어서 보강재의 경도나 형태의 영향은 확실히 규명되지 않고 있다. Bhansali 등[19]은 Al/Al₂O₃ 복합재료 보다 뛰어난데, 이는 Al/Al₂O₃ 복합재료는 양호한 계면을 가지나 Al/SiC 복합재료는 SiC입자(particle)와 알루미늄 합금 기지사이에는 취약한 계면(brittle interface)이 존재하기 때문으로 발표하였다. 반면에, SiC 입자의 큰 경도 때문에 Al/SiC 복합재료가 조금 더 나은 내마모성을 가진다는 연구결과도 있다[20].

금속복합재료의 제조방법에는 여러가지가 있으나 그 방법 중 가압용침법은 유기 및 무기 성형재(binder)를 사용하여 보강재를 예비성형체(preform)로 만들고, 용융된 금속을 압력 상태에서 침투시킨 다음 응고함으로써 제조하는 방법이다. 현재까지 가압용침법의 공정조건에 대해서는 많은 연구가 수행되었다. 가압시 예비 성형체의 수축과 회복, 보강재 파손, 용융된 기지금속의 침투과정과 응고과정 등에 관한 연구[2]와 가압에 의한 보강재의 배향성과 기계적 물성에 관한 연구[21], 보강재와

기지의 계면반응에 관한 연구[22]등이 있었고, 가압용침법의 공정기술을 이용하여 금속복합재료로 국소보강된 디젤엔진의 피스톤을 제작하는 연구[23]등이 있다.

본 연구에서는 자체 제작한 예비성형체와 Saffil 및 Fiberfrax의 상용예비성형체를 이용하여 가압용침법으로 금속복합재료를 제조한 후 상호비교 평가하기 위하여 기계적 물성인 인장강도, 충격에너지, 경도등을 규명하고, 알루미늄 금속복합재료의 대표적인 특성 중의 하나인 마모특성을 속도의 변화에 따라 관찰한다.

2. 실험방법

2-1. 사용재료

본 연구에 사용한 기지재료는 AC8A 주물용 알루미늄 합금인 Al-Si-Cu-Mg-Ni계로서 내열강도, 내마모성, 내열팽창이 우수해 자동차의 내연기관에 주로 사용되고 있다. 이 재료는 Cu, Mg, Ni가 다량 함유된 재료로서 Cu, Mg는 큰 열처리 효과를 얻을 수 있으며, Ni는 내열강도, 내마모성에 크게 기여하는 성분으로 알려져 있다. Table 1은 이 재료의 기본 물성과 화학조성을 나타낸 것이다[24].

강화재료는 영국 ICI사의 "Saffil" 알루미늄 단섬유(Al_2O_3)로 RF grade δ -결정상을 가지는 재료이다. 이 보강재는 silica를 5% 함유하고 있는 재

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of AC8A Al alloy

Elements Composition	Chemical composition(w/o)							Mech. properties
	Si	Cu	Mg	Ni	Fe	Mn	Al	σ_{ut} (MPa)
	12.7	1.1	0.9	1.57	0.8	0.1	Rem.	275~

Table 2. Specifications of alumina short fiber

Material	Density (g/cm^3)	Diameter (μm)	Length (μm)	Tensile strength (GPa)	Young's modulus (GPa)
Al_2O_3 (Saffil)	3.3	3.0	150	2.01	310
Al_2O_3 (Saffil)-R	3.3	3.0	64	2.01	310
Al_2O_3 (Fiberfrax)-R	3.2	2.5	762	1.73	105

료이다. 단섬유에 함유된 silica는 Al합금과의 젖음성과 결합력을 향상시킨다고 보고되고 있다. Table 2는 이러한 보강재의 기본물성치를 나타낸 것이다[25]. 그리고 자체제작한 예비성형체와의 비교를 위해 사용된 "Saffil"과 "Fiberfrax" 예비성형체는 Al_2O_3 단섬유를 이용해 제조된 것으로 직경이 11cm이고 두께가 2cm이며, 부피분율이 각각 15%와 20%인 상용화된 제품이다.

2-2. 금속복합재료의 제조 및 시편준비

금속복합재료를 제조하기 위해서는 예비성형체의 준비과정과 가압용침 제조공정을 거쳐야 하는데, 본 연구에서는 예비성형체 제조시 보강재의 부피분율을 제어가 용이한 진공압출법을 이용하였다.

예비성형체의 제조를 위해서 무기성형체인 silica를 5%의 수용액으로 만든 후 제조하고자 하는 부피분율로 보강재를 넣고, 보강재끼리 1차적 뭉침을 억제하기 위하여 초음파 세척기에서 세척 후 교반기에 넣어 일정 속도로 5분 동안 교반한다. 이렇게 준비된 알루미늄 단섬유를 예비성형체 몰드에 부어 진공압을 30~40mmHg으로 일정하게 유지하여 수용액을 추출한다. 제조된 예비성형체의 크기는 상용화 제품인 Saffil과 Fiberfrax와 같은 직경이 11cm, 두께는 2cm이다. 끝으로 예비성형체 내에 잔류한 수분 및 불순물 제거를 위해 초음파 건조과정을 거쳐 1000°C에서 소결을 하여 완성한다.

금속복합재료의 제조는 널리 사용되고 있는 가압용침법으로 행하였으며, 상세한 제조공정은 다음과 같다. 알루미늄을 800°C에서 용해시키고, 예비성형체는 질소(N_2) 분위기의 전기로에서 같은 온도로 예열시켰다. 그 후 350°C로 예열한 금형에 예비성형체와 용탕을 소입하고 25MPa의 압력으로 약 30초 동안 가압용침하여 원판형의 잉곳(지름: 11cm, 높이: 2cm~3cm)을 제조하였다.

제조된 금속복합재료는 T6 열처리, 즉 510°C에서 4시간 용체화 처리한 후 170°C에서 4시간 동안 시효처리를 하였다. 열처리과정 중 시효처리시간은 로크웰 경도시험기(Rockwell Hardness Tester, SHIMADZU Co.)를 이용하여 시효시간에 따라 최고 경도가 나타나는 시간으로 결정하였다. 또한, 기지재료도 동일한 조건으로 잉곳을 제조한 후, 열처리는 금속복합재료와 같은 온도와 시간으로 용체화 처리하였고 시효처리시간은 170°C에서 6시간으로 하였다.

그리고, 예비성형체와 금속복합재료의 제조상태를 확인하기 위해서 주사전자현미경(SEM)과 광학현미경을 이용하였다.

2-3. 물성실험

기본물성의 비교는 자체제조한 "POSTECH" 예비성형체와 상용화제품 "Saffil", "Fiberfrax" 예비성형체를 이용하여 금속복합재료를 제조한 후, 인장, 충격 및 경도 실험을 실시하여 평가하였다. 시편채취는 가압방향의 수직한 면에서 하였으며, Fig. 1은 인장 및 충격시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이다. 인장시험을 위해서 사용된 시험기는 만능인장시험기(UTM, SHIMADZU Co.)로 1mm/min의 변위제어로 각 재료마다 3회 이상의 시험을 수행하였다. 동적인 파괴에너지를 얻기 위해 실시한

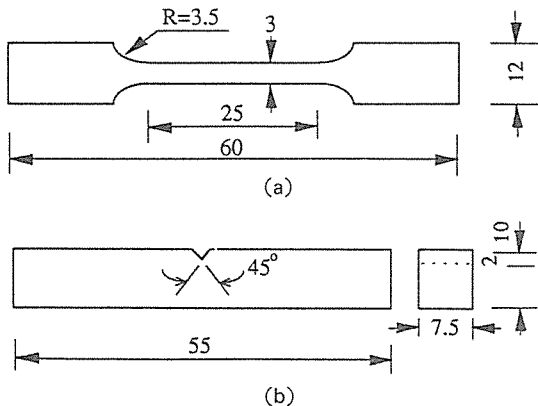


Fig. 1. Dimensions of specimens(unit : mm) ;
(a) Tensile and (b) Charpy impact test specimen

충격시험은 인장시편과 동일한 평면에서 채취한 후 V-notch 시편을 가공하여 Charpy Impact 시험기(SHIMADZU Co.)로 수행하였으며, 시험후 재료의 파단 형태를 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. 또한 보강재에 의한 재료의 경도증가 정도를 관찰하기 위하여 Rockwell B-scale(SHIMADZU Co.)로 Set point B-30에서 경도시험하였다.

2-4. 마모실험

마모시험은 Fig. 2의 개략도와 같은 spindle type (Riken-Ogoshi Co.)의 마모시험기를 사용하였으며, 이 시험기에서 마모 속도는 상대재의 회전속도에 의해 결정되고 마모거리는 상대재가 회전한 거리를 나타낸다. 그리고 하중은 spring force를 이용해서 이동거리에 비례하는 값으로 나타낸다.

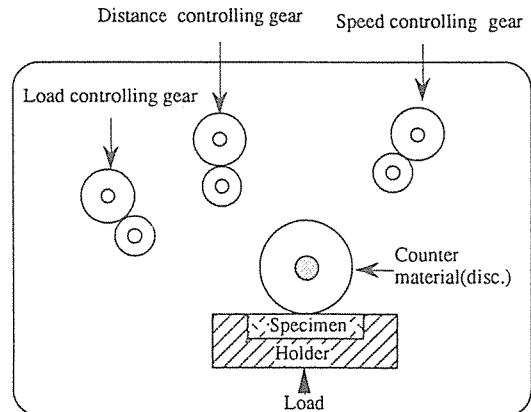


Fig. 2. Schematic illustration of abrasive wear tester.

시험편의 크기는 50×30×5(mm³)이고, 상대재료는 SCM4를 사용하였다. 시험전 시험편과 상대재의 표면은 sand paper #800로 각각 균일하게 연마하여 표면조도를 일정하게 하였다. 그리고 마모량은 10⁻⁵g까지 측정이 가능한 전자 저울을 사용하여 마모전과 후의 질량을 비교하여 측정하였다.

마모실험에 영향을 주는 변수들로는 최종마모하중, 마모거리, 상대마모속도, 분위기 온도상태 등이 있다[13~14]. 본 연구에서는 상온 건식 마모시험을 수행하였으며 마모실험 조건은 최종마모하중을 12.6kgf로, 마모거리는 100m로 고정시킨

상태에서 상대마모속도를 0.082, 0.98, 1.97, 3.62m/s로 각각 변화시켜 가면서 마모량의 변화를 관찰하였다. 마모면은 마모기구와 마모현상을 미시적으로 관찰하기 위해서 주사전자현미경(SEM)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 금속복합재료의 제조

가압용침법에 의한 금속복합재료의 제조는 세라믹 단섬유로 된 예비성형체에 지지금속을 침투시키는 방법으로, 복합화를 원하는 제품의 전체 또는 부분의 형상을 예비성형체로 미리 준비하여야 한다. 이러한 예비성형체의 제조기술은 금속복합재료를 제조하는데 필수적인 제조공정 중의 하나이다. 그 방법 및 공정은 일부분만 밝혀져 있을 뿐이다. 예비성형체의 제조공정 중 중요한 인자로는 섬유의 균일한 분포, 성형체의 결합 및 부피분율의 제어 등이 있으며, 본 연구에서는 보강재의 균일한 분포 및 보강재의 뭉침을 억제하기 위하여 초음파세척기, 교반기 및 진공압 추출기를 이용하였다. 진공압추출기를 사용하기 전의 예비성형체는 높이에 따른

밀도 차이가 존재하지만 진공압추출 후의 예비성형체는 밀도 차이가 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

또한 예비성형체는 성형성이 유지되어야 하며 주조과정 중 지지금속의 용탕이 침투할 수 있도록 충분한 기공성과 침투가압력에 견딜 수 있는 압축강도를 가져야 한다. 이를 위해서 성형제(binder)의 사용은 적절하게 조절되어야 한다[3]. 성형제의 양이 적을 때에는 충분한 기공성을 가질 수 있으나 침투가압력에 견딜 수 있는 예비성형체의 압축강도는 얻을 수 없다. 반면 성형제의 양이 많아지면 예비성형체의 적정 압축강도를 유지할 수 있으나 금속복합재료의 제조후 성형제가 결합으로 작용하기 때문에 물성저하의 원인이 되기도 한다.

본 연구에서는 무기성형제(inorganic binder)인 물유리(silica colloid)를 수용액 대비 5%의 함유량으로 제조하여 사용하였다. Fig.3은 자체제작 예비성형체(POSTECH-15%)와 상용화된 예비성형체(Saffil-15%)의 미세구조를 보여주고 있다. POSTECH과 Saffil 모두 위치에 관계없이 성형제가 섬유와 섬유사이에 균일하게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 그림에서와 같이 Saffil 예비성형체는 알루미늄 단섬유의 종횡비(aspect ratio)

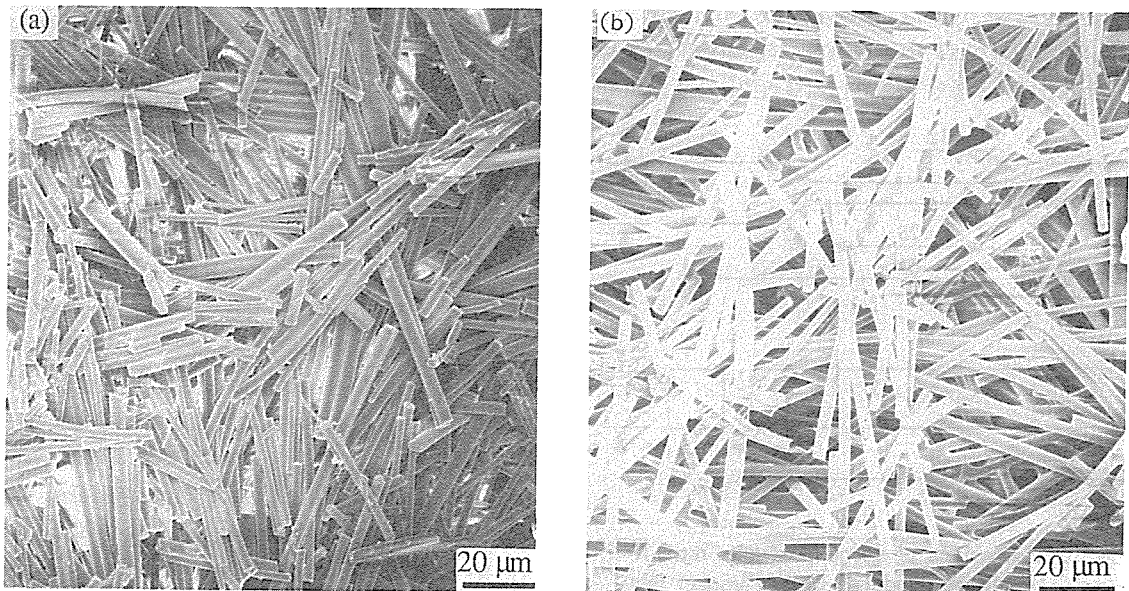


Fig.3. SEM photographs of preforms. (a) POSTECH(15%) (b) Saffil(15%)

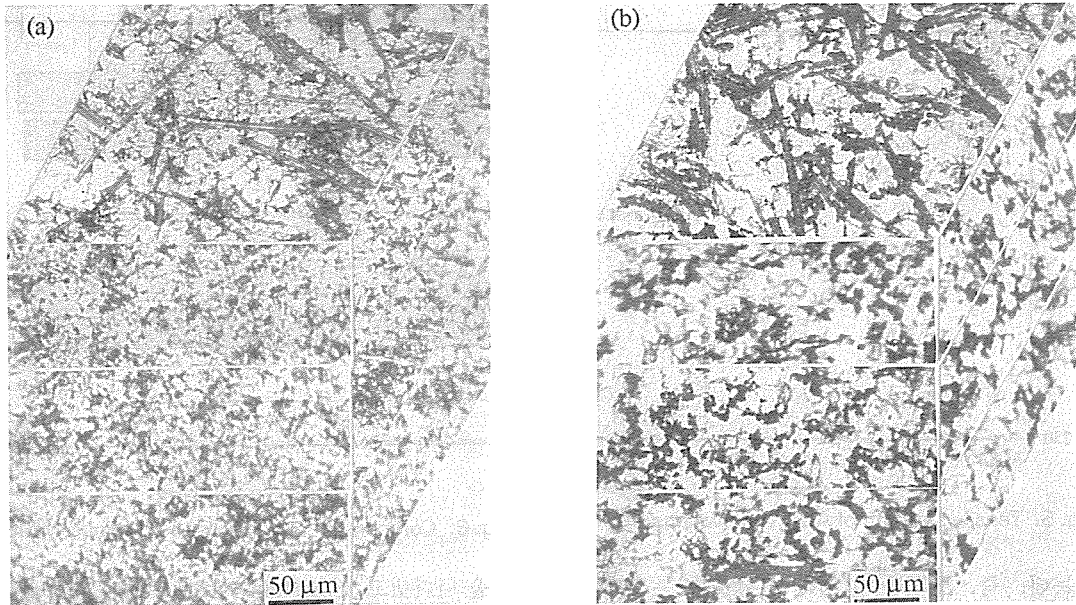


Fig. 4. Microstructures of MMCs by squeeze infiltration method. (a) POSTECH(15%) (b) Saffil(15%)

가 POSTECH 보다는 1/3정도로 작으며, 성형제를 더 많이 사용하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 건조방식에 있어서도 성형제의 뭉침이 발생되지 않은 것으로 보아 빠른 시간에 건조가 이루어진 것으로 판단된다. Saffil 예비성형체에서 알루미늄 단섬유의 종횡비(aspect ratio)가 작은 것은 보강재의 부피분을 제어를 원할하게 하려는 시도와 비교적 낮은 압력으로 제조하였다는 것을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 4는 가압용침법에 의해 제조된 POSTECH과 Saffil 금속복합재료의 미세구조를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 두 복합재료 모두 알루미늄 단섬유는 높이 방향에 따라 비교적 고르게 분포하고 있으며, 가압방향에 수직한 방향으로 배향하고 있음을 확인할 수 있다.

3-2. 인장강도

Fig. 5는 인장실험의 결과를 나타낸 것으로 각각 3회 이상의 실험값을 평균하여 도식화한 것이다. 그림에서는 편의상 Saffil은 “S”, Fiberfrax는 “F”, 그리고 POSTECH은 “P”라고 표기하였으며, 뒤에 붙은 “15”와 “20”은 각각 15%와 20%의 부피분율을

나타낸 것이다. 그림과 같이 기지재료로 사용된 AC8A의 인장강도에 비해 Al/Al₂O₃ 금속복합재료인 POSTECH(15%)와 Saffil(15%)는 약 10%의 향상된 결과를 보였으나, Fiberfrax(15%)의 경우 약 4%의 향상에 그쳤다. 이것은 Table 1에 나타난 바와 같이 보강재 자체의 물성차이로 생각되는데, Fiberfrax는 알루미늄 단섬유의 성분이 Al₂O₃와 SiO₂가 각각 50%를 함유하고 있고, 이에 비해 Saffil은 Al₂O₃와 SiO₂의 비가 95%와 5%의 성분비를 나타내는 차이에서 기인되는 것이다.

부피분율이 20%로 증가한 경우의 인장강도 역시 POSTECH(20%)과 Saffil(20%)은 11%와 14%의 향상을 보인데 비해 Fiberfrax(20%)은 7%의 향상을 보였다. 부피분율의 증가에 따른 인장강도의 향상은 모든 재료에 대해서 그 증가폭은 크지 않았다. 이는 금속복합재료의 인장강도가 보강재에 의해서도 영향을 받지만 기지재에 의해서도 영향을 받는다는 것을 나타낸다. 즉 기지재인 AC8A 알루미늄 합금의 연신율이 1% 미만으로 알루미늄 중에서는 비교적 취성의 성격을 띠고 있는 재료이기 때문에 인장강도의 향상은 두드러지지 않았다. 이것은 저자들의 다른 연구결과[4]에서도 확인할 수

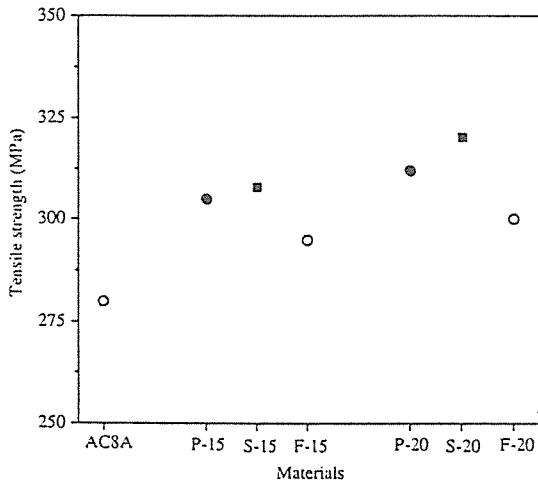


Fig. 5. Tensile strength of AC8A and various MMCs.

있는데, 즉, 연신율이 10% 이상을 갖는 Al6061 알루미늄합금을 기지재로 하였을 경우 Al/Al₂O₃ (15%) 금속복합재료의 인장강도는 모재에 비해 20% 이상의 향상을 보이는 것과 비교된다.

이상의 인장강도 실험결과와 같이 POSTECH 예비성형체와 상용화 제품인 Saffil 예비성형체로 제조된 금속복합재료가 비슷한 결과를 나타냄을 볼 때, 자체 제작된 POSTECH 예비성형체의 제조는 양호함을 알 수 있다. 한편, Fiberfrax 예비성형체로 제조한 금속복합재료는 알루미늄 단섬유의 기본물성이 달라 직접 비교하기에는 무리가 있는 것으로 생각된다.

3-3. 경도와 충격에너지

Fig. 6과 Fig. 7은 기지재로 사용한 AC8A 합금과 금속복합재료의 경도 및 충격특성을 각각 도식화한 것이다. 먼저 Fig. 6에 도식한 경도는 기지재인 AC8A 알루미늄 합금에 비해 예비성형체의 부피분율이 15%인 경우 POSTECH(15%)과 Saffil(15%)은 각각 35%의 향상을 보였으며, Fiberfrax(15%)는 13%의 향상을 보였다. 또한 부피 분율을 20%로 증가시켰을 때의 향상폭은 예비성형체의 부피분율이 15%였을 때에 비해 미미했으며, 모재 보다는 POSTECH(20%)과 Saffil(20%)은 약 38%의 높은

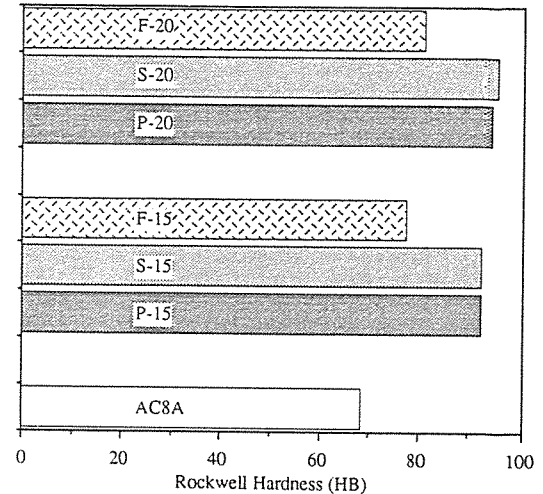


Fig. 6. Comparison of Hardness for various MMCs.

값을 나타냈고, Fiberfrax는 18%의 증가를 보였다.

Fig. 7에 나타난 충격에너지는 기지재로 사용된 AC8A 합금에 비하여 대체로 낮은 값을 나타내었고, 전체적으로 금속복합재료의 경도가 증가할수록 충격에너지는 떨어지는 것으로 나타났다. 부피분율이 15%인 경우 POSTECH(15%)과 Saffil(15%)은 모재의 94%와 90%의 충격에너지를 나타내었고, Fiberfrax(15%)는 77%를 나타내었다. 특히 부피분율을 20%로 증가시켰을 때의 충격에너지는 POS-

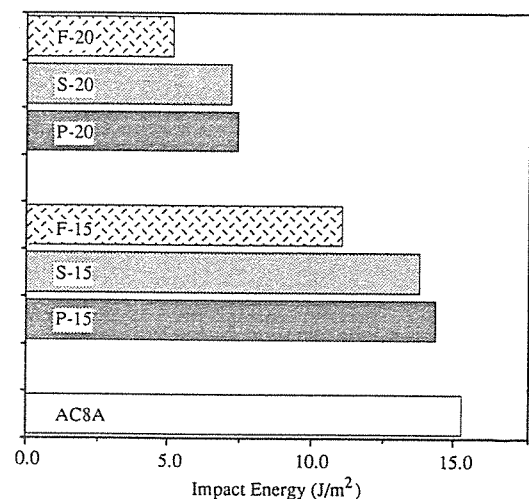


Fig. 7. Impact energy of various MMCs compared with AC8A.

TECH(15%)과 Saffil(15%)이 모재의 약 48%, Fiberfrax는 35%로 현저한 감소를 보여 보강재의 부피분율의 증가는 충격특성에는 취약함을 보여준다. 이러한 경향은 취성 재료인 세라믹 보강재를 사용한 금속복합재료의 가장 큰 문제점인 낮은 파괴인성치를 반영하는 것으로 이를 극복하는 것이 향후의 주요한 연구과제로 대두되고 있다.

Fig. 8은 충격후의 파단면을 관찰한 것으로 각 재료의 파단면의 특징을 나타내고 있다. Fig. 8(a)는 AC8A 알루미늄모재의 파면인데, 그림에서와 같이 작은 딥플(dimple) 모양과 벽개파면의 양상이 혼합되어 나타난다. 즉, 연성과 취성파괴가 혼합된 파괴거동이라는 것을 알 수 있는데, 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 연신율이 1% 미만인 AC8A 알루미늄합금의 특성에서도 확인할 수 있는 것이다. Fig. 8(b)는 POSTECH(15%) 금속복합재료의 파면으로 모재보다는 더 작은 딥플들이 형성되어 있으며, Fig. 8(c)는 Fiberfrax(15%)의 파면을 나타내고 있는 것으로 물결모양의 벽개파면형태가 두드러져 충격에너지가 POSTECH(15%)에 비해서는 훨씬 작음을 반증해주고 있다.

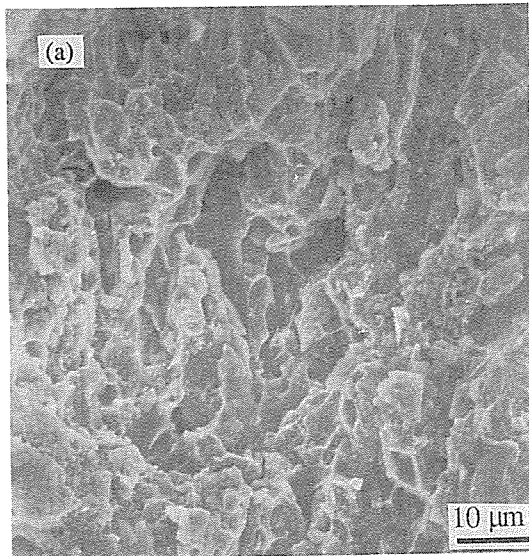


Fig. 8. SEM photographs of fractured surface after impact tests.

(a) AC8A Al alloy (b) POSTECH(15%)
(c) Fiberfrax(15%)

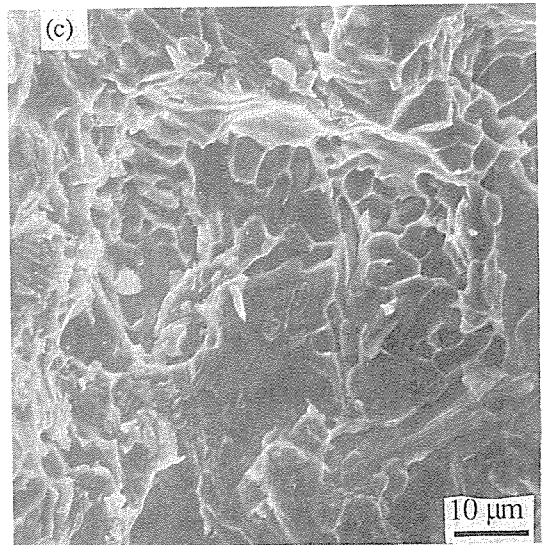
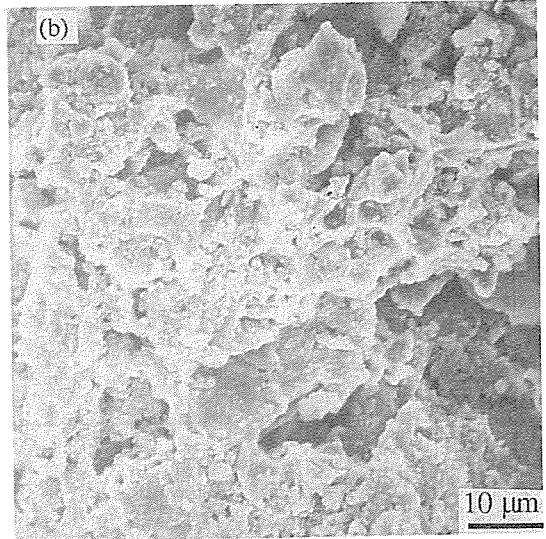


Fig. 8. (Continued)

3-4. 마모거동과 기구

Fig. 9는 본 연구에서 사용된 여러가지 금속복합재료의 마모실험 결과를 부피분율이 15%와 20%로 각각 구분하여 도시한 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 부피분율이 15%(Fig. 9(a))와 20%(Fig. 9(b))일 때 금속복합재료의 마모 경향은 비슷하게 나타났다. 알루미늄 모재의 마모 특성은 상대마모 속도가 증가하면서 마모량이 지

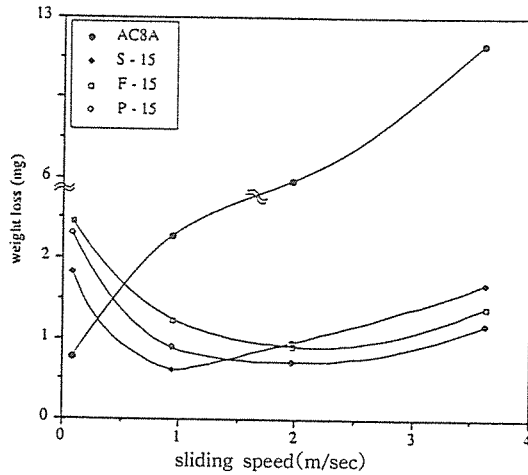
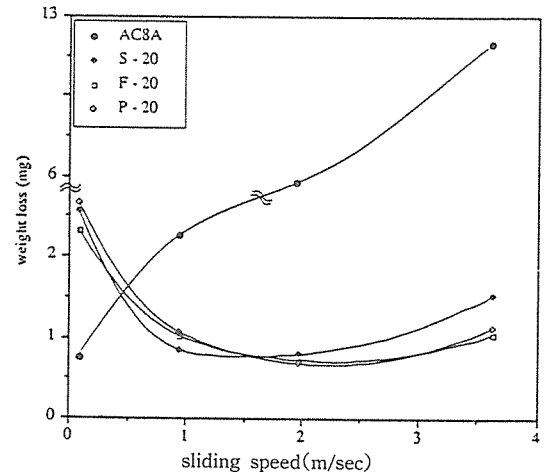
(a) Al/Al₂O₃ (15%) composites(a) Al/Al₂O₃ (20%) composites

Fig.9. The effect of sliding speeds on the wear behavior of various MMCs.

속적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 저속에서의 마모기구는 연삭마모(abrasive wear)이지만 속도가 증가함에 따라 응착마모(adhesive wear)가 지배적으로 나타나는 현상으로 인해 마모량이 증가하기 때문이다. 한편, 금속복합재료의 내마모성은 전체적으로 속도가 0.98m/s 이하에서는 기지재인 AC8A 알루미늄 합금 보다 떨어지는 경향을 보이나 상대마모 속도가 0.98m/s 이상에서는 기지재보다 내마모성이 우수한 것으로 나타났다. 이것은 속도가 낮은 0.98m/s 이하의 영역에서는 마모시 발생하는 경질의 보강재 마모입자가 상대재와 시편 사이에서 연삭마모를 가중시키는 역할을 하기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 속도가 증가하면서 기지재인 알루미늄의 마모면에서는 급격한 응착마모가 발생하는 반면 금속복합재료에서는 보강재에 의해서 응착마모가 저해되기 때문에 0.98m/s 이상이 되면서 금속복합재료는 기지재 보다 월등히 향상된 내마모성을 나타낸다.

금속복합재료의 마모형태를 속도에 따라 관찰해 보면 속도가 0.82m/s일때 보다 1.97m/s의 마모속도일 때 더 적은 마모량을 나타낸다. 이것은 속도가 0.082m/s일때는 앞에서도 언급했듯이 경질의 보강재가 연삭마모를 촉진시키는 역할을 하기 때문이다. 반면에 속도가 1.97m/s일때에는 속도 증가에 따른 마모면의 온도상승에 의해서 경질의 마모입

자가 마모면에 박히는 현상이 발생한다. 이러한 보강재의 박힘현상은 상대적으로 마모면에 보강입자의 존재비율을 증가시키는 역할을 해서 마모량이 저하된다. 그리고 1.97m/s 이상에서는 마모면의 온도상승이 재료의 밀림현상으로 이어져 마모량은

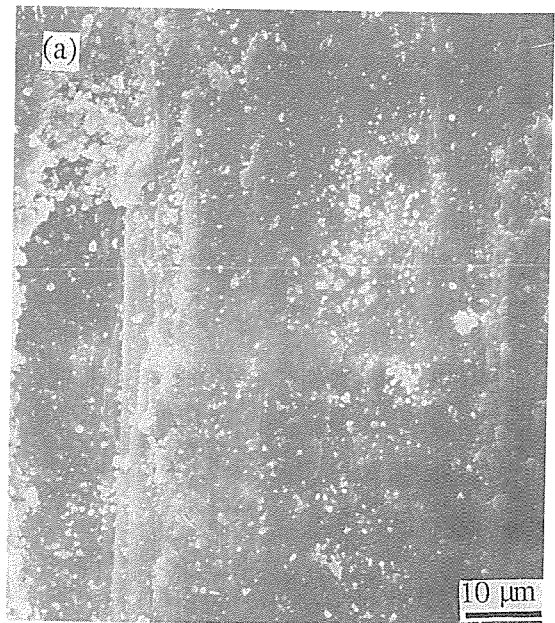


Fig.10. Wear surfaces of AC8A aluminum alloy with various sliding speeds.

(a) 0.082m/sec (b) 1.97m/sec
(c) 3.62m/sec

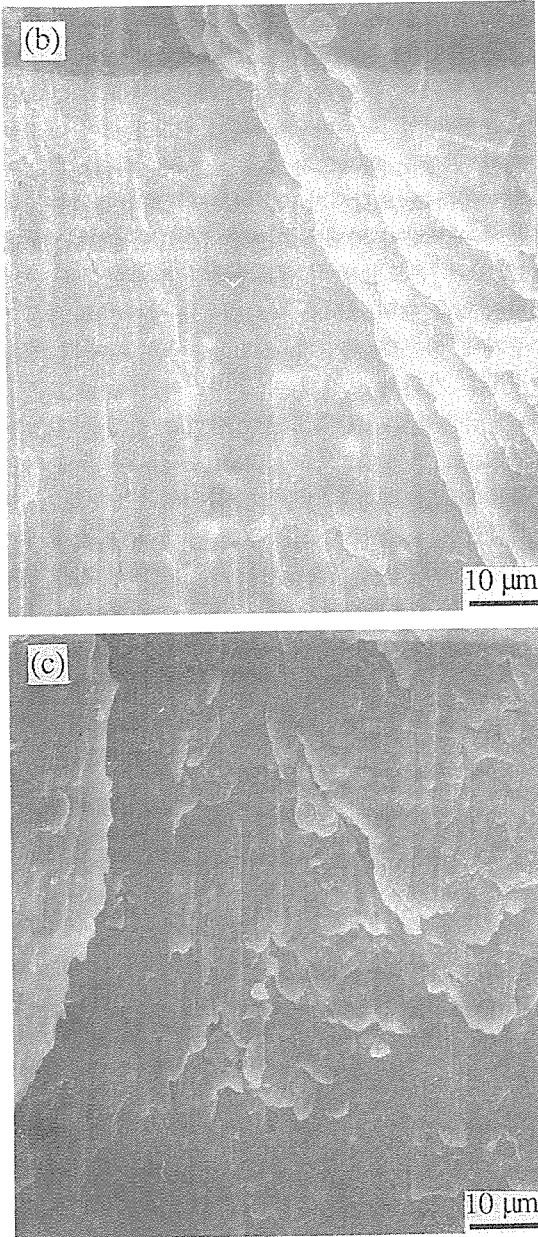


Fig. 10. (Continued)

다시 증가하게 된다. 이러한 마모형태는 재료의 마모면을 관찰해 보면 잘 알 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 기지재의 마모면과 금속복합재료의 마모면을 주사전자현미경(SEM)을 통해서 관찰한 것이다.

Fig. 10을 보면 기지재의 마모특성을 관찰한 것으로 상대마모 속도가 0.082m/s에서는 골패임현상으로 대별되는 연삭마모의 흔적을 볼 수 있고, 상대마모 속도가 증가해서 1.97m/s일때에는 응착

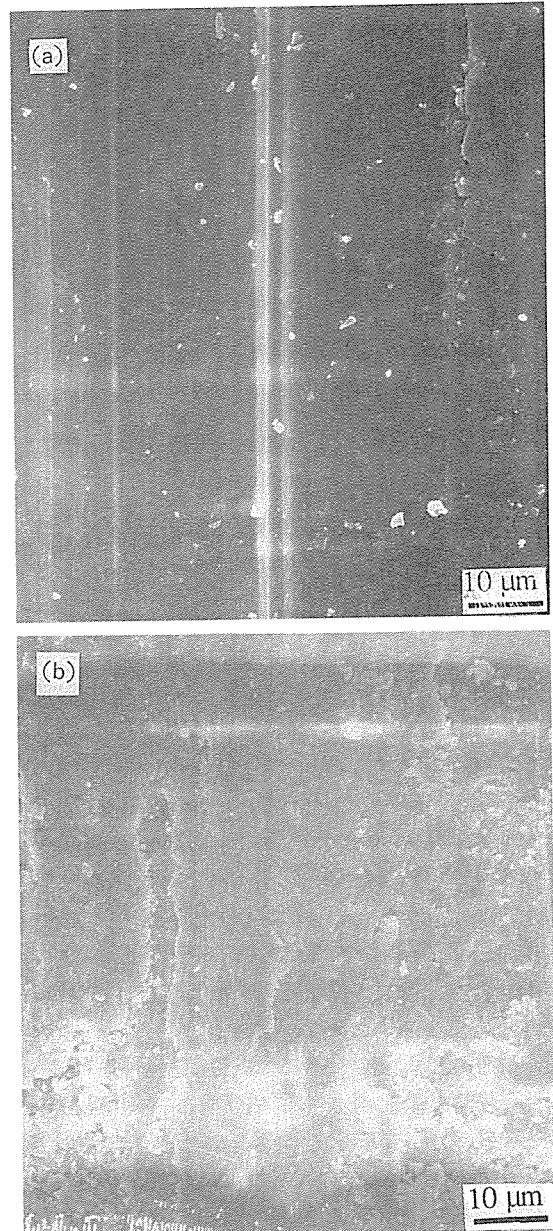


Fig. 11. Wear surfaces of POSTECH(15%) composites with various sliding speeds.
(a) 0.082m/sec (b) 1.97m/sec
(c) 3.62m/sec

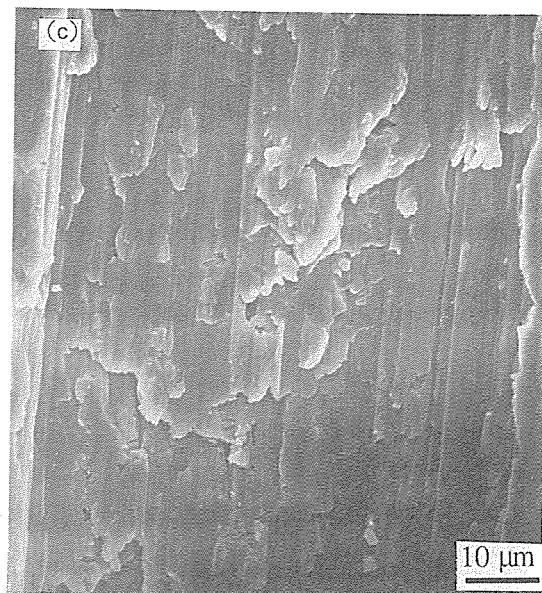


Fig. 11. (Continued)

현상을 볼 수 있다. 그리고 3.62m/s에서는 응착 현상과 재료의 밀립현상을 볼 수 있다. Fig. 11은 금속복합재료의 마모특성을 속도에 따라 관찰한 것으로 상대마모 속도가 0.082m/s에서는 기지재와 마찬가지로 골패임현상에 의한 연삭마모의 현상을 두드러지게 볼 수 있고, 속도가 점차 증가하면서 보강재의 박힘 현상과 밀립현상을 볼 수 있다. 그리고 전체적인 속도 영역에서 POSTECH과 Saffil의 마모특성과 비교해 보면 Saffil 제품은 0.98m/s 이하에서는 더 좋은 마모 특성은 나타내나 속도가 0.98m/s 이상에서는 더 많은 마모량을 나타낸다. 이것은 Saffil의 예비성형체는 보강재의 길이가 더 짧아 밀립현상에 저항하는 능력이 떨어지는 것으로 나타나고 있다.

결과적으로 볼 때 마모가 잘 일어나는 부분에 금속복합재료를 사용하기 위해서는 우선 적용되는 부품의 상대 속도가 어느정도인가를 확인해야 할 것이다. 즉, 저속영역에서는 보강재의 부피분율이 적은 것이 유리하고, 고속의 영역에는 보강재의 부피분율이 큰 것이 유리하다고 할 수 있다. 또한 제조가 가능하다면 종횡비(aspect ratio)가 큰 보강재를 사용하는 것이 마모 특성에는 유리한 것으로

나타나고 있다.

Fig. 12에는 금속복합재료의 마모현상을 알기 쉽게 모형화한 것이다. Fig. 12(a)는 속도가 비교적 저속인 영역 즉, 마모에 의한 온도발생이 재료의 연화 현상을 가져오지 않는 영역을 나타낸다. 이 영역에서는 보강재가 연삭입자의 역할을 하기 때문에 마모량이 기재에 비해서 많이 발생한다. Fig. 12(b)는 온도발생이 재료자체의 밀립현상을 동반하지 않을 때의 영역을 나타내는데 상대마모 속도의 증가에 따른 접촉면의 온도상승이 기지재의 연화 현상을 가져와 보강재 마모 부스러기(wear debris)가 금속복합재료의 표면에 박히는 현상을 관찰할 수 있다. 마지막으로 Fig. 12(c)는 상대마찰에 의한 온도상승이 크게 발생되어 재료의 밀립현상이 발생하는 것을 설명하는 것으로 이 영역은 상대재와 시편의 접촉면에서 발생하는 열에 의해서 기지재의

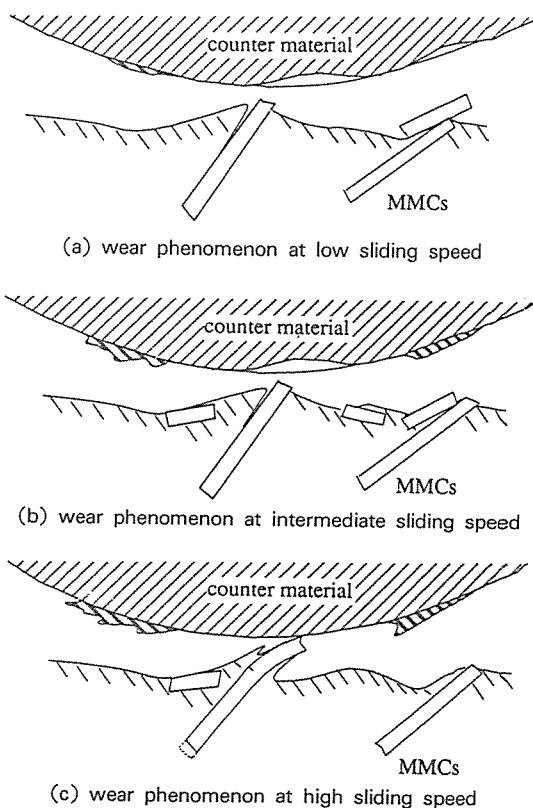


Fig. 12. Model of wear mechanism according to various sliding speeds for MMCs(Al/Al_2O_3).

연화현상이 급진전된다. 이것은 열영향에 의해 보강재 자체를 모재로부터 뽑히게(pull out)하여 밀어내는 역할을 한다. 이러한 밀림에 의한 마모를 억제시키기 위해서는 보강재의 길이가 긴 것을 사용하는 것이 유리하다는 것을 시사하고 있다.

Fig.9의 (a)와 (b)를 비교하여 부피분율이 15%와 20%때의 마모량을 관찰해 보면 전체적인 속도 구간에서 기지재나 금속복합재료의 마모현상은 모두 같은 형태로 나타난다. 그러나 보강재의 부피분율이 15%에서 20%로 증가하면 상대속도가 0.082m/s와 0.98m/s에서 마모량이 더 많아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 상대적으로 보강재의 증가로 인장강도는 증가하나 연삭마모에는 저해 역할을 하는 것으로 생각된다. 반면 상대속도가 1.97 m/s와 3.62m/s일 때에는 보강재의 양이 증가하면 이러한 보강재에 의해 밀리는 현상이 저지되고 보강재에 의한 열전달효과로 인해 마모량이 감소하는 것을 볼 수 있다.

끝으로 자체 제작한 예비성형체와 상용화 제품인 Saffil과 Fiberfrax의 예비성형체를 이용해 제조한 금속복합재료를 비교하면, 전체적인 마모거동은 유사한 경향을 보이고 있으나, 고속인 3.62m/s에서는 중형비가 제일 작은 Saffil의 마모량이 다소 증가하는 양상을 나타나고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 상용화되어 있는 "Saffil" 및 "Fiberfrax"의 예비성형체와 자체 제조한 예비성형체(POSTECH)를 이용하여 가압용침법으로 금속복합재료를 제조한 후 기본 물성 및 마모특성을 상호 비교한 것으로 그 결과는 아래와 같다.

1) 진공압을 이용한 장치의 개선으로 섬유의 균일한 분포와 높이 방향의 밀도차를 최소화한 예비성형체를 얻을 수 있었으며, 금속복합재료의 제조상태도 양호한 결과를 보였다.

2) 인장강도는 부피분율이 15%인 경우 POSTECH과 Saffil은 모재에 비해 약 10%의 향상을 보였고, 보강재의 기본물성이 떨어지는 Fiberfrax는 4%가 향상되었다. 또한 부피분율의 증가에 따른

인장강도는 미미한 증가를 보였다.

3) 충격에너지는 금속복합재료가 기지재로 사용된 AC8A 합금에 비하여 대체로 낮은 값을 나타내었고, 경도는 기지재인 AC8A 합금 보다 금속복합재료가 13%~35% 범위의 증가를 보였다. 특히 금속복합재료는 경도가 증가할수록 충격에너지는 떨어지는 것으로 나타났다.

4) 금속복합재료의 내마모성은 기지재 보다 크게 향상되었다. 기지재의 주요 마모기구는 저속에서는 연삭마모, 중속에서는 응착마모, 그리고 고속에서는 응착마모와 밀림현상이 지배적이었으며, 금속복합재료의 마모기구는 저속에서는 연삭마모, 중속과 고속에서는 보강재의 박힘과 밀림현상에 의한 마모가 지배적이었다. 전체적인 마모경향은 POSTECH과 Saffil 및 Fiberfrax의 금속복합재료가 서로 비슷한 특성을 나타내었다.

감사의 글

본 논문은 1993년도 G7-Project(경량 금속복합재료 개발)의 연구비 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 한경섭, 황운봉, 송정일, "한국 복합재료의 현황 조사", 한국복합재료학회지, 제 4 권, 제 2 호, 1991, pp.79-95.
2. Clyne, T.W. and Mason, J.F., "The squeeze infiltration process for fabrication of metal matrix composites", Metallurgical Transaction A, Vol.18A, 1987, pp.1519-1530.
3. Lim, T.W., "Fabrication and mechanical behaviour of aluminum matrix composite materials", Ph.D. Dissertation, State Univ. of New York at Buffalo, 1990.
4. Lim, T., Kim, Y.H., Lee, C.S. and Han, K.S., "Mechanical properties and fracture behaviors of aluminum matrix composites", Proceeding of ICCM/VIII, 1991, pp.21 C-1-14.

5. Maier, R.D., Smale, M.D., Krucek, T. W. and Budinger, B.O., "Fatigue behavior of squeeze cast metal matrix composites for diesel pistons", SAE Technical paper series, No.920456, 1992.
6. Miura, N., Miyake, N., "Ceramic fiber reinforced piston for high performance diesel engines", SAE Technical paper series, No.830252, 1983.
7. Dinwoodie, J., "Automotive applications for MMC's based on short staple alumina fibres", SAE Technical paper series, No.870437, 1987.
8. Folgar, F. and Krueger, W.H. and Goree, J.G., "Fiber FPMCMs in reciprocating engines", Ceram.Eng.Proc., Vol.5, No.7/8, 1984, pp.643.
9. Prasad, S.V., Rohatgi, P.K. and Kosel, P.K., 1986, "Mechanisms of material removal during low stresses and high stress abrasion of aluminum alloy-zircon particle composites", Materials Science and Engineering, Vol.80, pp.213-220.
10. Prasad, S.V. and Rohatgi, P.K., 1987, "Tribological properties of Al alloy particle composites", J. of Metals, Nov., p.22-26.
11. Fukunaga, H., "Squeeze casting processes for fibre reinforced metals and their mechanical properties", Cast reinforced metal composites, ASM, 1988, pp.101-108.
12. Rohatgi, P.K., Asthana, R. and Das, D., 1986, "Solidification, structures, and properties of cast metal-ceramic particle composites", International Metal Reviews, Vol.31, pp.115-139.
13. Subramanian, C. and Kishore, "Influence of graphite type, modification and hot working on wear of aluminum based particulate composites", J. of Reinforced Plastics and Composites, Vol.3, Oct., 1984, pp.278-293.
14. Das, S., Prasad, S.V. and Ramachandran, T.R., "Microstructure and wear of cast (Al-Si alloy)-graphite composites", Wear, Vol. 133, 1989, pp.173-187.
15. Friend, C.M., "The effect of temperature on the tensile strength of short δ -alumina fiber/aluminum alloy metal matrix composites", Scripta metallurgica, Vol.23, 1989, pp.33-37.
16. Hosking, F.M., Portillo, F.F., Wundelrin, R. and Mehrabian, R., "Composites of Aluminum alloys : fabrication and wear behavior", J. of Materials Science, Vol.17, 1982, pp.477-498.
17. Rana, F. and Stefanescu, D.M., "Friction properties of Al-1.5 Pct Mg/SiC particulate metal matrix composites", Metallurgical Transactions A, Vol.20A, 1989, pp.1564-1566.
18. 봉하동, 송정일, 양유창, 한경섭, "Al/Al₂O₃/C 금속복합재료의 제조 및 마모거동", 한국복합재료학회지 투고중, 1994.
19. Bhansali, K.J. and Mehrabian, R., "Abrasive wear of aluminum-matrix composites", J. of Metals, Sept., 1982, pp.30-34.
20. Bhansali, K.J. and Silence, W.L., "Metallurgical Factors Affecting Wear Resistance", Met. Prog., November, 1981, pp.38-43.
21. Bengtsson, S., Li, C.H. and Warren, R., "Microstructural Studies of δ -Alumina Fiber Reinforced Aluminum and Al Alloys", Proceeding ICCM-VII, Vol.3, Nov.22, 1989, pp.607-612.
22. 홍순형, 이길근, 김진, 이상관, 1990, "Squeeze Casting에 제조된 Al₂O₃/Al-Si 금속복합재료의 고온강도와 계면반응", 대한금속학회지, Vol.28, No.7, pp.615-622.
23. 김진, 이상관, 홍순형, 이길근, 1989, "Squeeze Casting을 이용한 금속복합재료 제조공정 개발", 한국복합재료학회지, Vol.2, No.2, pp.1-9.
24. Data sheet from JIS H-5202
25. Data sheet from I.C.I.Co